

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Luka Pavličić

Zagreb, 2016. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Gorana Baršić

Student:

Luka Pavličić

Zagreb, 2016. godina

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Posebno bi se zahvalio svojim mentorima Doc. dr. sc. Gorani Baršić i Dr. sc. Vedranu Šimunoviću na savjetima pri izradi rada

Za kraj bi se zahvalio svojoj obitelji na pruženoj podršci tijekom ovih godina studiranja.

Luka Pavličić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

LUKA PAVLIČIĆ

Mat. br.: 0035185770

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**Mjerenje srednjeg promjera navojnih prstena metodom s mjernim
čeljustima**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

Measurement of pitch diameters of thread rings using V-jag method

Opis zadatka:

1. Opisati metode mjerenja etalonskih navojnih prstena, s naglaskom na mjeriteljske mogućnosti Nacionalnog laboratorija za duljinu na području mjerenja navoja.
2. Izračune preporučene uputom EURAMET cg-10 *Determination of Pitch Diameter of Parallel Thread Gauges by Mechanical Probing* prilagoditi metodi s mjernim čeljustima.
3. Izvršiti mjerenja srednjeg promjera etalonskih navojnih prstena metodom s mjernim čeljustima.
4. Provesti analizu ostvarenih rezultata mjerenja te donijeti zaključke o prednostima i nedostacima metode mjerenja s mjernim čeljustima.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc. Gorana Baršić

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016.

2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.

3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.

3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

Sadržaj

Sadržaj	I
Popis slika	III
Popis tablica	IV
Popis oznaka.....	V
1. UVOD	1
2. NAVOJI	2
2.1. Zavojnica i navoj	2
2.2. Vijak i matica.....	4
2.3. Definicija srednjeg promjera navoja.....	6
2.3.1. Jednostavni srednji promjer navoja.....	6
2.3.2. Srednji promjer navoja d_2	6
2.4. Mjerenje srednjeg promjera navoja	7
2.4.1. Granična mjerila za srednji promjer navoja	7
2.5. Vrste navoja	8
2.5.1. Metrički navoj	9
3. MJERNE METODE	10
3.1. Mjerenje srednjeg promjera	12
3.1.1. Metoda s tri valjčića	12
3.1.2. Metoda s T-ticalom	13
3.1.3. Metoda s mjernim čeljustima	14
3.1.4. Ručne mjerne metode.....	15
3.1.5. Optičke metode za mjerenje srednjeg promjera navoja	15
4. PROVEDBA MJERENJA U LABORATORIJU	16
4.1. Postupak mjerenja metodom s T-ticalom	16
4.1.1. Rezultati mjerenja metodom s T-ticalom	21
4.2. Postupak mjerenja metodom s mjernim čeljustima	25

4.2.1.	Rezultati mjerenja metodom s mjernim čeljustima (V-utor)	27
4.3.	Postupak mjerenja metodom s mjernim čeljustima (EURAMET).....	29
4.3.1.	Rezultati mjerenja metodom s mjernim čeljustima (EURAMET).....	32
5.	Mjerne nesigurnosti	34
5.1.	Nesigurnost rezultata mjerenja jednostavnog srednjeg promjera navoja dobivenih metodom s T-ticalom.....	34
5.1.1.	Nesigurnost mjerenja s mjernim prihvatom i T-ticalom	36
5.1.2.	Nesigurnost mjere referentnog prstena T-ticalom.....	36
5.2.	Nesigurnost rezultata mjerenja jednostavnog srednjeg promjera navoja dobivenih metodom s mjernim čeljustima.....	37
5.2.1.	Nesigurnost veličine n	38
5.3.	Usporedba rezultata	40
5.4.	Grafički prikaz srednje vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera	41
6.	ZAKLJUČAK	42
	LITERATURA.....	43

Popis slika

Slika 1. Zavojnica.....	2
Slika 2. a) jednovojni navoj, b) dvovojni navoj, c) trovojni navoj	3
Slika 3. Primjer profila navoja	3
Slika 4. Spoj vijka i matice.....	4
Slika 5. Profil navoja.....	6
Slika 6. Granična mjerila za srednji promjer.....	7
Slika 7. Osnovni profili navoja	8
Slika 8. Metrički navoj	9
Slika 9. Razlika između finog i normalnog metričkog navoja	9
Slika 10. Metoda s tri valjčića.....	12
Slika 11. Mikrometar s nastavcima te mjerenje promjera vanjskog navoja.....	15
Slika 12. Uređaj za provedbu mjerenja metodom s T-ticalom.....	16
Slika 13. Referentni prsten	18
Slika 14. Mjerenje kontrolnog prstena s T-ticalom.....	18
Slika 15. Uređaj za provedbu mjerenja metodom s mjernim čeljustima	25
Slika 16. Stezna naprava za mjerke s V-utorom	25
Slika 17. Mjerenje jednostavnog srednjeg promjera metodom s mjernim čeljustima	26
Slika 18. Mjerenje metodom s mjernim čeljustima.....	29
Slika 19. Određivanje udaljenosti između mjernih kuglica	30
Slika 20. Dijagram vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera za prsten M24 m max x3	41
Slika 21. Dijagram vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera za prsten M30 x 1,5	41

Popis tablica

Tablica 1. Metode koje se koriste za mjerenje srednjeg promjera navoja	11
Tablica 2. Tablica standardnih vrijednosti mjernih elemenata.....	17
Tablica 3. Kategorija umjeravanja 1a	36
Tablica 4. Sastavnice mjernih nesigurnosti veličine n	38
Tablica 5. Kategorija umjeravanja 2a	39
Tablica 6. Usporedba rezultata.....	40

Popis oznaka

<u>Oznaka</u>	<u>Mjerna jedinica</u>	<u>Opis</u>
P_h	mm	Uspon
φ	°	Kut uspona
α	°	Kut navoja
P	mm	Korak navoja
d_D	mm	Promjer mjernog elementa
L	mm	Izmjerena duljina
B, γ	°	Kutevi profila navoja
D_2	mm	Jednostavni srednji promjer
A_1	mm	Korekcija naližeganja mjernih valjčića
A_2	mm	Korekcija naližeganja mjerne sile
m	mm	Udaljenost središta mjernih elemenata
F	N	Mjerna sila
C	mm	Konstanta T-ticala
Δx	mm	Utvrđena razlika podešene vrijednosti i izmjerene vrijednosti na navoju
D_{2naz}	mm	Nazivni srednji promjer navoja
$(a+b)$	mm	Konstanta mjerki s V urezom
α_{jag}	°	Kut utora mjerki s V utorom
D_{ref}	mm	Promjer referentnog prstena
n	mm	Udaljenost središta mjernog elementa u osi mjerenja metodom s mjernim čeljustima

1. UVOD

Navojni sklop jedan je od nezaobilaznih dijelova u strojarstvu. Navojnu geometriju nema smisla promatrati samu za sebe već je potrebno uvijek razmatrati vijak i maticu kao jedan funkcionalni sklop.

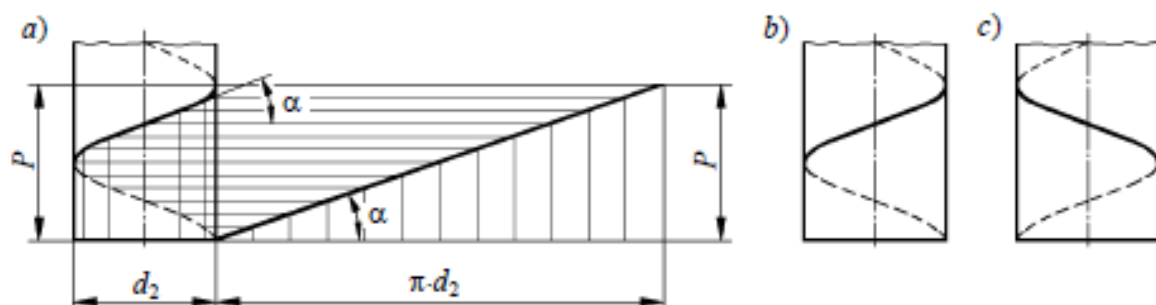
Od samih početaka izrade navoja javila se potreba za standardizacijom kako bi se omogućila zamjenjivost navojnih elemenata. U tom smislu, geometrija i tolerancije današnjih navoja strogo su propisane međunarodnim normama i stručnim tehničkim uputama, kao i metode mjerenja karakterističnih veličina navoja. Navoji su tako definirani oblikom profila, kutem, korakom i promjerima (mali, veliki i srednji promjer). Glavna veličina koja se koristi u proračunima strojarskih konstrukcija svakako je srednji promjer navoja. Drugim riječima, ako je srednji promjer navoja u granicama tolerancije za očekivati je funkcionalnost navojnog sklopa.

Ovaj rad usmjeren je na metode mjerenja i proračuna jednostavnog srednjeg promjera navojnih kontrolnika za vanjski navoj (navojnih prstena). U sklopu ovog rada provedeno je niz mjerenja s dvije različite metode (metodom s T-ticalom i metodom s mjernim čeljustima) te su se koristila tri načina računa za određivanje mjere jednostavnog srednjeg promjera. Na kraju rada provedena je analiza mjernih rezultata i iznesen je zaključak.

2. NAVOJI

2.1. Zavojnica i navoj

Navoj je osnovni dio vijka i matice preko kojega se prenose sile. Temelj svakog navoja je zavojnica koja nastaje obavijanjem kosog pravca oko cilindra promjera d_2 , slika 1.a). Desna zavojnica se dobije obavijanjem pravca oko cilindra u smjeru kazaljke na satu (desni navoj) slika 1.b), dok se lijeva zavojnica dobije obavijanjem u smjeru suprotnom od kazaljke na satu (lijevi navoj) slika 1.c). [1]



Slika 1. Zavojnica

a) nastanak zavojnice, b) desna zavojnica, c) lijeva zavojnica

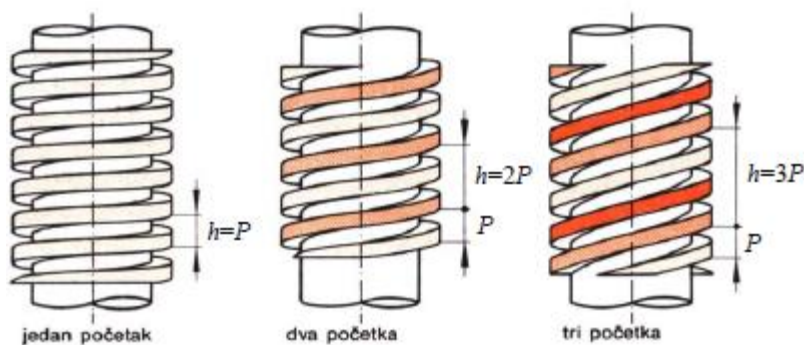
Udaljenost između dvije točke zavojnice koje leže na istoj osi naziva se korak navoja P . Kut nagiba obavijenog pravca, koji je jednak kutu između tangente zavojnice i normalne ravnine na njezinu os, naziva se kut uspona navoja, te prema slici 1 za njega vrijedi:

$$\tan \alpha = \frac{P}{\pi \cdot d^2}$$

gdje je:

- α - kut uspona zavojnice (navoja) °
- P - korak zavojnice (navoja), mm
- d_2 - promjer zavojnice (srednji promjer navoja), mm

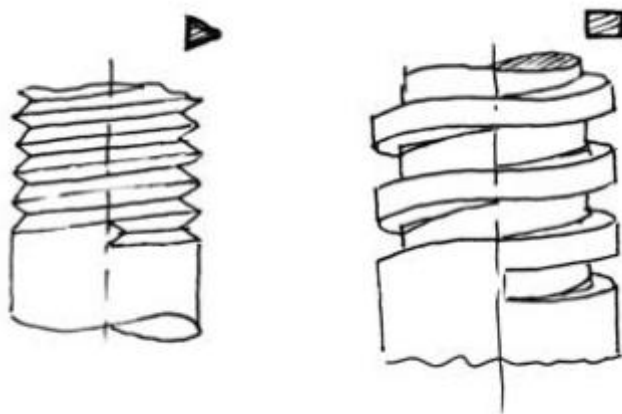
Ako se oko cilindra obavija jedna ili više paralelnih zavojnica dobije se dvovojna ili viševojna zavojnica (slika 2). [3]



Slika 2.

a) jednovojni navoj, b) dvovojni navoj, c) trovojni navoj

Kada bi po navojnoj liniji oko cilindra namatali žice trokutastog, pravokutnog ili drugih presjeka, dobili bi navoje trokutastog, pravokutnog ili drugih profila zuba, (slika 3.) [3].

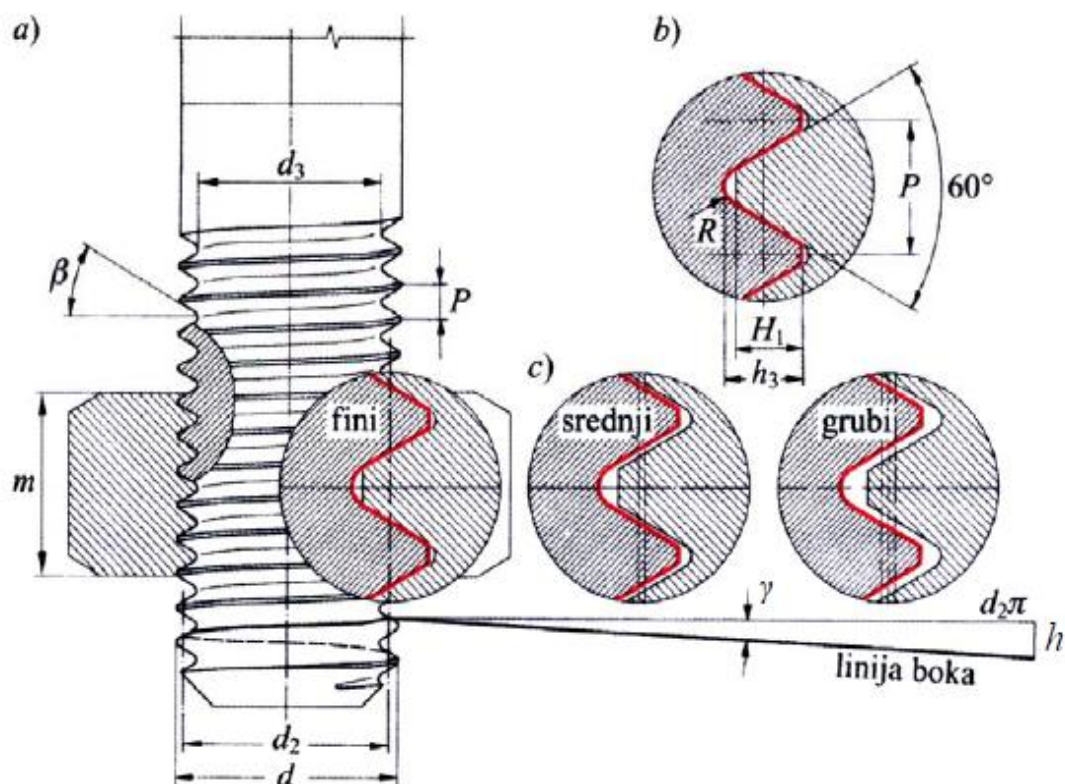


Slika 3. Primjer profila navoja

Lijevo (trokutasti profil) - desno (pravokutni profil)

2.2. Vijak i matica

Vijak ima vanjski navoj, izrađen na vanjskoj površini cilindra. Matica ima unutarnji navoj izrađen u cilindričnom provrtu. Unutarnji navoj može biti izrađen i u provrtu u nekom strojnom dijelu. Kako bi se vijak mogao spojiti s maticom, navoji vijka i matice moraju biti usklađeni. Glavna dimenzija navoja je nominalan promjer navoja a to je uvijek vanjski promjer navoja, te je označen s d za vijke i D za matice [4].



Slika 4. Spoj vijka i matice

Značenje veličina sa slike 4. je kako sljedeći:

a) Vijak i matica:

d - vanjski promjer vijka, mm

d_2 - srednji promjer navoja (bokova), mm

d_3 - promjer korijena navoja vijka (promjer jezgre), mm ; za metričke navoje je:

$$d_3 = d - 1,22687 \cdot P$$

P - korak navoja (udaljenost između dva susjedna zupca), mm

β - kut nagiba boka zuba (kut profila), °

D_1 - unutarnji promjer navoja matice, mm

m - visina matice, mm

h - uspon navoja, mm

γ - kut uspona, °

b) Profil metričkog ISO navoja:

H_1 - nosiva dubina navoja, mm

h_3 - dubina navoja, mm

R - polumjer zaobljenja u korijenu navoja, mm

c) Prema kvaliteti izrade, vijci i matice se dijele na sljedeće klase (DIN 267)

F - fina

A - srednja - za opću upotrebu

B - srednje gruba

C - gruba

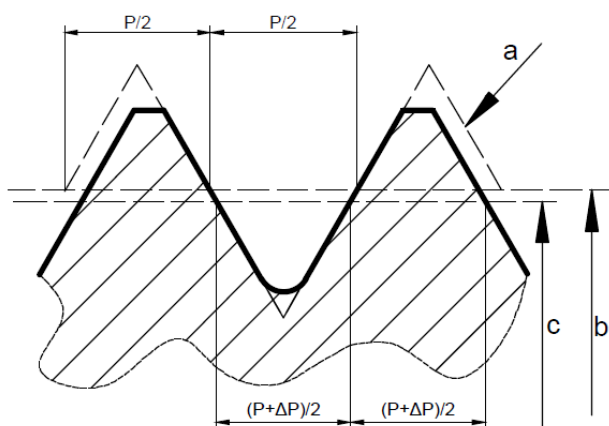
2.3. Definicija srednjeg promjera navoja

2.3.1. Jednostavni srednji promjer navoja

Jednostavni srednji promjer navoja (slika 5b). je promjer srednjeg cilindra ili konusa koji siječe stvarni navoj tako da je širina jednog navojnog utora (mjerena paralelno sa središnjom osi navoja) jednaka polovici osnovnog korak navoja. Obično se mjeri metodama s mjernim valjčićima ili mjernim kuglicama. Kod konusnih navoja srednji promjer se mijenja duž središnje osi navoja. Kod teorijskih navoja jednostavni srednji promjer jednak je srednjem promjeru navoja. [2].

2.3.2. Srednji promjer navoja d_2

Srednji promjer navoja (slika 5c) izvedena je veličina koja ovisi o parametrima koji određuju navoj(kut profila, korak, uspon) i o veličinama karakterističnim za pojedinu mjernu metodu (mjerna sila, mjerni elementi). Srednji promjer navoja nije moguće izravno izmjeriti, već ga je potrebno izračunati prema definiciji: "promjer zamišljenog cilindra, čiji plašt siječe profil navoja tako da širina navojnog grebena i utora budu jednake." [2].



Slika 5. Profil navoja

gdje je :

- | | | |
|---|---|------------------------------------|
| a | - | Teorijski navoj |
| b | - | Jednostavni srednji promjer navoja |
| c | - | Srednji promjer navoja |

2.4. Mjerenje srednjeg promjera navoja

Metode mjerenja navoja koji se razmatraju u ovom završnom radu odnose se na mjerenje jednostavnog srednjeg promjera navojnih prstena za simetrične navoje.

Rezultati prikazani u radu dobiveni su razmatranjem metričkih navoja, međutim principi i spoznaje se mogu bez ograničenja primijeniti na mjerenje cilindričnih i konusnih navoja s ravnim bokovima

2.4.1. Granična mjerila za srednji promjer navoja

Granična mjerila služe za kontrolu promjera navoja, te razlikujemo granična mjerila za kontrolu malog, srednjeg i velikog promjera. Takva mjerila prilikom korištenja moraju odgovarati navoju koji se kontrolira te sadrže stranu "ide" i "ne ide". Prilikom kontrole pojedinog navoja u slučaju njegove ispravnosti spoj će ostvariti strana "ide", pri čemu strana "ne ide" ne smije ostvariti spoj kako bi mogli reći da je navoj valjan. Granična mjerila imaju propisane tolerancije srednjeg promjera, kuta i koraka navoja. Granična mjerila za srednji promjer navoja najčešće su u obliku navojnih prstena za provjeru vanjskih navoja i u obliku navojnih čepova za provjeru unutarnjih navoja, (Slika 6.).

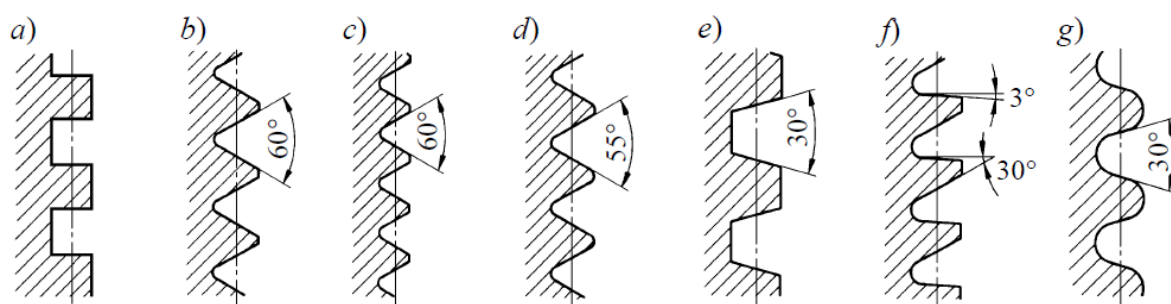


Slika 6. Granična mjerila za srednji promjer

Tijekom korištenja mjerila se troše te je potrebno kontrolirati njihovu ispravnost, to se može vršiti protumjerilima ili umjeravanjem. Protumjerila su granična mjerila, ali puno bolje kvalitete te manjih tolerancijskih odstupanja [2].

2.5. Vrste navoja

Profili navoja dijele se na plosnate i trokutaste. Profil plosnatog navoja je kvadrat zato se takav navoj naziva i kvadratni navoj, (slika 7a). Navoji kojima je teorijski profil trokut dijele se na više vrsta: metrički navoj, cjevasti (Whithworthov) navoj, trapezni navoj, pilasti navoj, obli navoj itd., (slike 7b do 7g). [1]



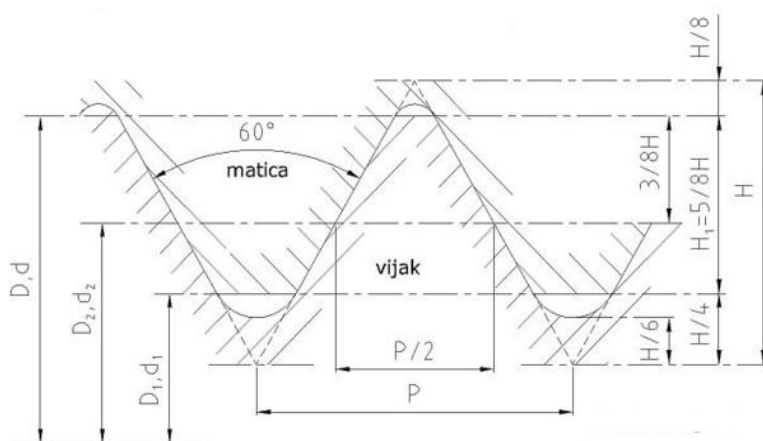
Slika 7. Osnovni profili navoja

a) kvadratni navoj b) metrički normalni navoj c) metrički fini navoj d) cjevasti (Whithworthov) navoj e) trapezni navoj f) pilasti navoj g) obli navoj

2.5.1. Metrički navoj

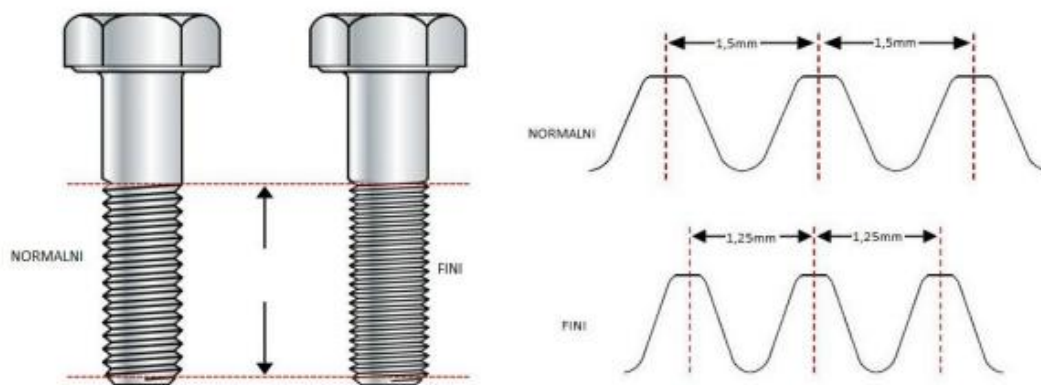
Metrički navoj definiran je i opisan normom ISO 68-1:1998.

Ima teorijski profil istostraničnog trokuta s kutom profila navoja od 60° , (slika 8.). Normalni metrički navoj se upotrebljava u općoj strojogradnji kod vijaka i matica, odnosno poželjno je koristiti ovu vrstu metričkog navoja gdje god je moguće. Fini metrički navoj se koristi u specijalnim slučajevima kada je potrebna velika sigurnost od odvijanja, kod kratkih vijaka, tankostjenih cijevi ili preciznih pomaka vijka u aksijalnom smjeru. Normalni metrički navoji označavaju se slovom M i nazivnim promjerom navoja d u mm, npr. M 20. Kod finih metričkih navoja uz oznaku se još dodaje i veličina koraka P u mm, npr. M 20 x 1,5. Ako se radi o lijevom navoju, oznaci navoja dodaje se i međunarodna oznaka LH (left-hand) npr. M 20 x 1,5 L



Slika 8. Metrički navoj

Razlika između normalnog i finog metričkog navoja vidi se na slici 9.



Slika 9. Razlika između finog i normalnog metričkog navoja

3. MJERNE METODE

Za izračunavanje srednjeg promjera navoja prema svim kategorijama umjeravanja potrebno je izmjeriti karakterističnu udaljenost m (pr. udaljenost središta valjčića se označava s m kod metode s tri valjčića) koja ovisi o metodi te kuti i koraku navoja, za što je potrebno koristiti niz uređaja i metoda.

Prema EURAMET uputi [6] izdvojene su dvije metode: metoda s tri valjčića za mjerenje srednjeg promjera vanjskih i metoda s T-ticalom za mjerenje srednjeg promjera unutarnjih navoja. Gotovo svi nacionalni mjeriteljski instituti koriste ove dvije metode uz primjenu univerzalnih mjernih uređaja ili trokoordinatnih mjernih uređaja s opremom za mjerenje navoja. U tablici 1. prikazane su metode i mjerni uređaji koji se najčešće koriste pri određivanju srednjeg promjera navoja [2].

Mjerna metoda	Mjerni uređaj	Vanjski navoj	Unutarnji navoj	Srednji promjer	Kut	Korak
Metoda s T-ticalom	Univerzalni mjerni uređaj (T-ticalo) CMM	-	+	+	-	-
Metoda s mjernim čeljustima	Univerzalni mjerni uređaj	-	+	+	-	-
Metoda s mjernim valjčićima	Univerzalni mjerni uređaj (mjerni valjčići)	+	-	+	-	-
Mjerenje koraka navoja	Univerzalni mjerni uređaj (poluga za mjerenje koraka)	+	+	-	+	-
Skeniranje profila navoja	MasterScanner CMM	+	+	+	+	+
Mjerenje oblika navoja	Profilometri	+	+		+	+
Metoda aksijalnog presjeka (mjerni nožići)	2D optički mjerni uređaj	+	Preko otiska	+	+	+
Metoda s projiciranjem slike	2D optički mjerni uređaj	+	Preko otiska	+	+	+

Tablica 1. Metode koje se koriste za mjerenje srednjeg promjera navoja

3.1. Mjerenje srednjeg promjera

3.1.1. Metoda s tri valjčića

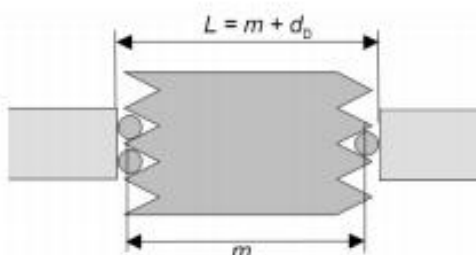
Metoda s tri valjčića smatra se najpouzdanijom metodom za mjerenje srednjeg promjera vanjskih navoja. Mjerenje se provodi na univerzalnom mjernom uređaju ili upotrebom ručnih mjerila (mikrometara). Mjeri se udaljenost preko tri valjčića u dva međusobno okomita presjeka, (slika 10) [5]. Odabir valjčića odgovarajućeg promjera vrši se prema koraku i kutovima boka navoja.

Izračun iznosa srednjeg promjera navoja se provodi prema sljedećem izrazu:

$$d_2 = L - d_D \left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} + 1 \right) + \frac{P}{2} \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) - A_1 + A_2$$

gdje je :

d_2	-	Srednji promjer vanjskih navoja, mm
L	-	Mjera dobivena preko valjčića, mm
d_d	-	Promjer mjernih valjčića, mm
α	-	Kut profila navoja, °
P	-	Korak navoja, mm
A_1	-	Korekcija naližeganja mjernih valjčića, mm
A_2	-	Korekcija o mjerne sile, mm



Slika 10. Metoda s tri valjčića

3.1.2. Metoda s T-ticalom

Metoda s T-ticalom smatra se najpouzdanijom metodom za mjerenje srednjeg promjera unutarnjih navoja. Mjerenje se provodi na univerzalnom mjernom uređaju koji uključuje sve potrebne nastavke za provedbu metode s T-ticalom.

Detaljnije objašnjenje metode kao i postupak mjerenja bit će prikazan u poglavlju 4.1. ovog rada.

Srednji promjer navoja računa se prema izrazu:

$$D_2 = m + d_D \left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) - \frac{P}{2} \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) + A_1 - A_2$$

gdje je :

D_2	-	Srednji promjer unutarnjih navoja, mm
m	-	Udaljenost između središta kuglica, mm
d_D	-	promjer valjčića
α	-	Kut navoja °
P	-	Korak navoja, mm
A_1	-	Korekcija naližeganja valjčića, mm
A_2	-	Korekcija mjerne sile, mm
L	-	Mjera dobivena t-ticalom, mm
L_{12}	-	Mjera dobivena t-ticalom, između pozicija 1 i 2 mm
L_{23}	-	Mjera dobivena t-ticalom, pozicija 2 i 3, mm
C	-	Konstanta T - ticala

3.1.3. Metoda s mjernim čeljustima

Metoda s mjernim čeljustima provodi se korištenjem univerzalnog mjernog uređaja uz pomoć ravnih kapica.

Ova metoda nije prihvaćena od većine instituta, odnosno nije metoda čiji bi se rezultati prihvatili kao pouzdani.

U daljnjem radu detaljnije je pojašnjen postupak mjerenja te sam opis metode, a kroz rezultate mjerenja koji su dani bit će vidljivo da se ovom metodom može pouzdano utvrditi srednji promjer navoja.

Srednji promjer računa se prema izrazu:

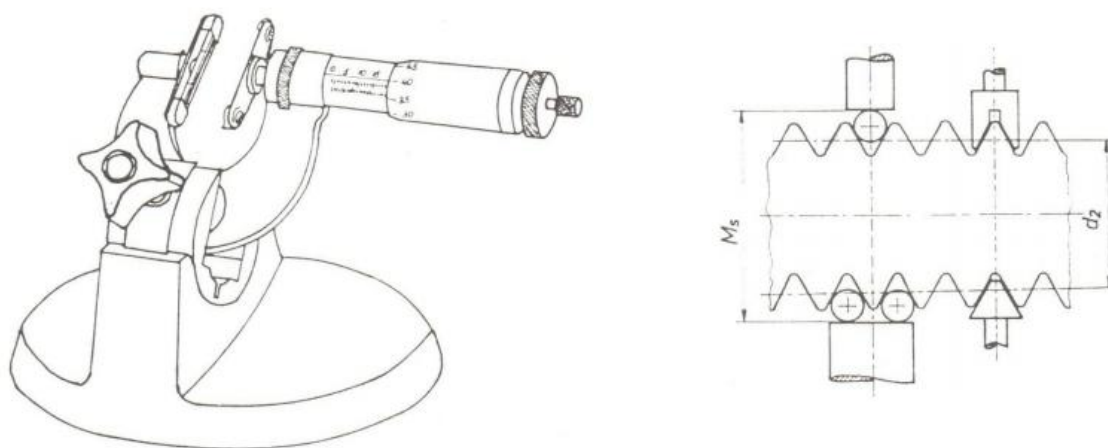
$$D_2 = E + (a + b) - \frac{P}{2} \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{\frac{p^2}{8}}{D_{naz} - \frac{P}{2} \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{d_D}{2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}} + \Delta x$$

gdje je:

D_2	-	Izmjerena vrijednost srednjeg promjera unutarnjeg navoja, mm
D_{naz}	-	Nazivni srednji promjer navoja, mm
E	-	Kombinacija planparalelnih graničnih mjerki, mm
$(a+b)$	-	Konstanta mjerki s V-utorom
P	-	Korak navoja, mm
α	-	Kut navoja, °
d_D	-	Promjer mjernih kuglica, mm
Δx	-	Utvrđena razlika podešene vrijednosti i izmjerene vrijednosti na navoju x, mm

3.1.4. Ručne mjerne metode

Od ručnih mjerila, ako se radi o manjim točnostima, može se koristiti za mjerenje srednjeg promjera vanjskog navoja mikrometar s posebnim nastavcima u obliku konusa i žlijeba kao što je prikazano na slici 15. Na točnost ovakvog mjerenja utječe pogreška kuta profila kao i pogreška koraka navoja jer u tom slučaju mjerni nastavci ne naliježu točno na bok navoja te treba računati s pogreškama od 0,025 do 0,2 mm. Prethodno je potrebno izvršiti podešavanje mikrometra sa odgovarajućim kontrolnim nastavcima.



Slika 11. Mikrometar s nastavcima te mjerenje promjera vanjskog navoja

3.1.5. Optičke metode za mjerenje srednjeg promjera navoja

Optičke metode mjerenja srednjeg promjera vanjskih navoja zahtijevaju primjenu 2D mjernih uređaja. Preduvjet ovih metoda je da kvaliteta površine navoja bude što bolja (brušeni navoj). Koriste se dvije mjerne metode: metoda aksijalnog presjeka i metoda sa slikom sjene. Uz metodu aksijalnog presjeka koriste se parovi nožica koji svojim oštricama naliježu na bok navoja u aksijalnom presjeku. Na određenom razmaku od oštrice ugravirana je paralelna linija koja služi za viziranje. Naime, zbog zavojite geometrije navoja bok navoja nije vidljiv u aksijalnom presjeku i os objektiva potrebno je zakrenuti za kut uspona navoja.

Srednji promjer navoja d_2 dobije se kao razlika očitavanja na prednjoj i stražnjoj strani istovrsnih bokova navoja duž y osi 2D mjernog uređaja. [2]

4. PROVEDBA MJERENJA U LABORATORIJU

Mjerenja su izvršena u Nacionalnom laboratoriju za duljinu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

U svrhu izrade ovog završnog rada mjerenja su provedena nad dva kontrolna prstena:

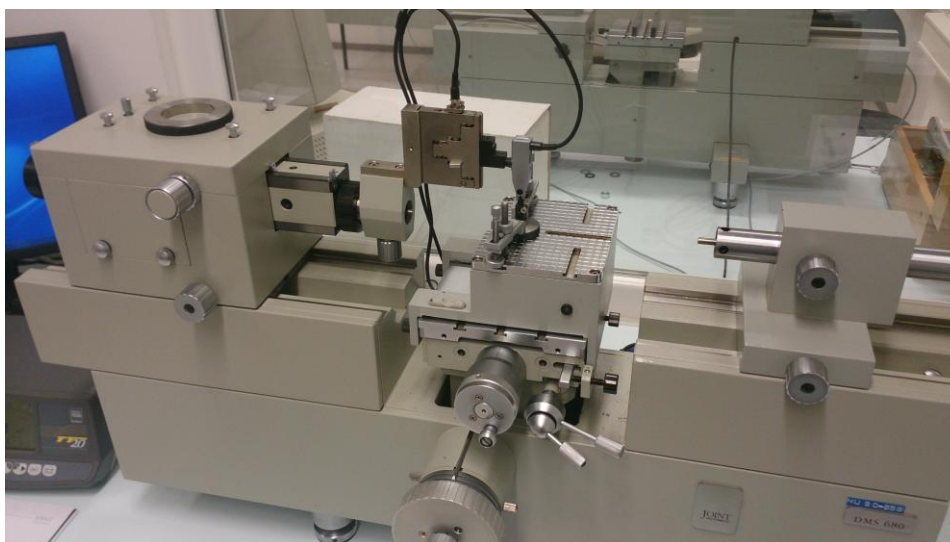
- 1.) M24 m max x 3
- 2.) M30 x 1,5

Mjerenje se vršilo kako bi se odredio jednostavni srednji promjer navoja pojedinog prstena, svaki prsten mjerio se metodom s T-ticalom i metodom s mjernim čeljustima, kako bi se na kraju moglo odrediti kolika su odstupanja pojedine metode te kako bi se dokazalo da se s obje metode pouzdano može utvrditi jednostavni srednji promjer navoja.

U nastavku ovog rada bit će prikazan postupak računanja pojedinom metodom te usporedba rezultata mjerenja.

4.1. Postupak mjerenja metodom s T-ticalom

Metoda s T-ticalom kao što je ranije spomenuto provodi se univerzalnom mjernom uređaju koji na sebi uključuje sve potrebne nastavke za provedbu metode s T-ticalom.



Slika 12. Uređaj za provedbu mjerenja metodom s T-ticalom

Prije početka mjerenja potrebno je odrediti promjer d_D mjernog elementa, pravilan odabir promjera jedan je od ključnih elemenata koji može značajno pridonijeti mjernoj nesigurnosti.

Odabir ticala odgovarajućeg promjera provodi se prema koraku i kutovima boka navoja, prema sljedećoj jednadžbi:

$$d_0 = \frac{P}{2} \cdot \frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

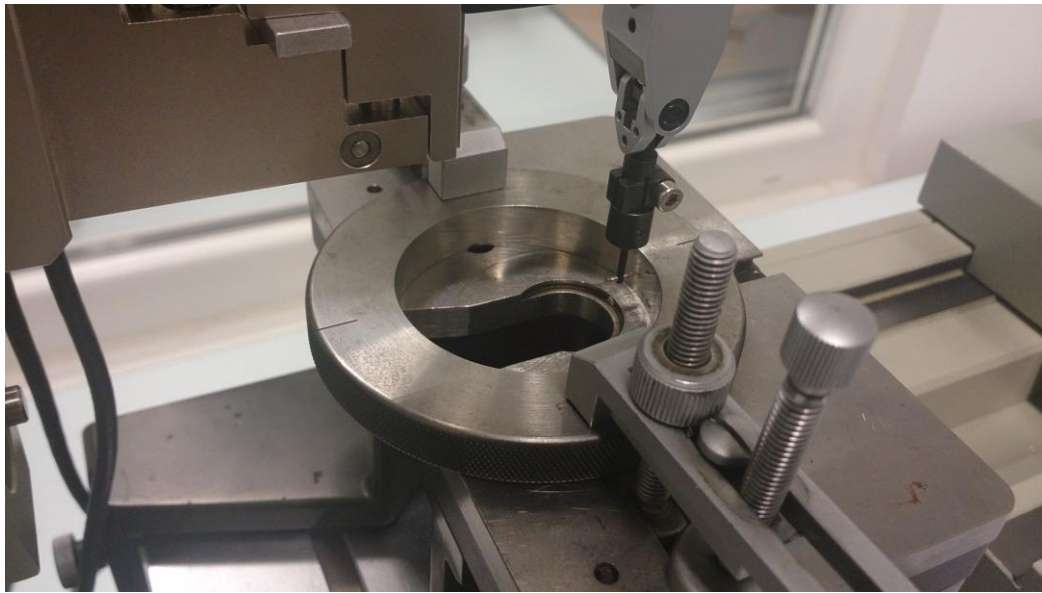
Nakon računanja promjera mjernog elementa d_0 , iz tablice 2 odabiremo prvu najbližu tabličnu vrijednost d_D .

Redni broj	Mjerni valjčići d_D , mm	Promjer T-ticala	Konstanta T-ticala C, mm	Promjer mjernih kuglica d_D , mm
1	0,17	0,335	0,5	0,8
2	0,195	0,455	0,5	1,35
3	0,22	0,53	0,8	1,8
4	0,25	0,62	1	2,3
5	0,29	0,725	1	3,1
6	0,335	0,895	1,2	
7	0,39	1,1	2	
8	0,455	1,35	1,7	
9	0,53	1,65	2,5	
10	62	2,05	3	
11	0,725	2,55	3,3	
12	0,895	3,2	5	
13	1,1	4	4,7	
14	1,35			
15	1,65			
16	2,05			
17	2,55			
18	3,2			
19	4			
20	5,05			
21	6,35			

Tablica 2. Tablica standardnih vrijednosti mjernih elemenata

Prilikom mjerenja ovom metodom na početku je potrebno odrediti konstantu C , ona se utvrđuje prije svakog mjerenja uz pomoć referentnog prstena (etalon za unutarnji promjer), (slika 13.). Tijekom određivanja konstante vršimo 3 mjerenja od kojih kao mjerodavnu uzimamo aritmetičku sredinu ponovljenih rezultata.

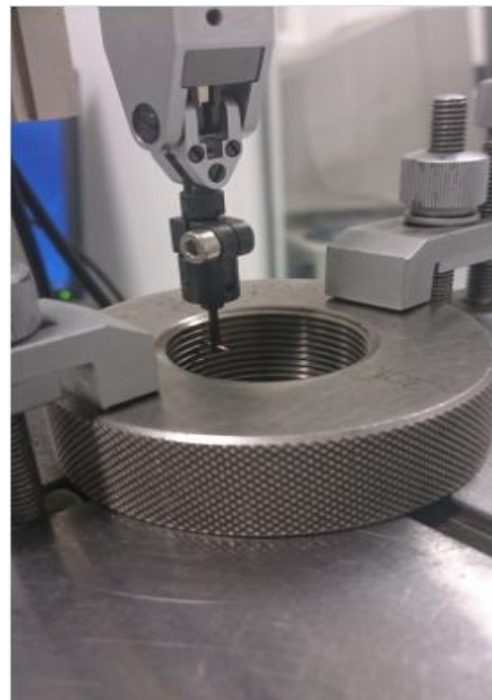
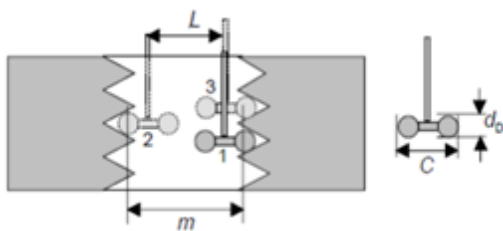
$$C = d_{ref} - \bar{x}$$



Slika 13. Referentni prsten

Nakon određivanja konstante pomoću referentnog prstena na univerzalnom jednoosnom uređaju, na isti uređaj postavlja se kontrolni prsten.

U položaju 1. ticalom ulazimo u jedan utor navoja u kojem postavljamo ishodišnu nulu nakon čega prelazimo na drugu stranu prstena i ulazimo u drugi utor (položaj 2) gdje očitavamo hod ticala, povratak u točku 3 vršimo kao kontrolu odstupanja položaja 3 od položaja 1. Ovakav postupak provodi se 3 puta za svaku seriju mjerenja.



Slika 14. Mjerenje kontrolnog prstena s T-ticalom

Mjera dobivena T-ticalom računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$L = \frac{L_{12} + L_{23}}{2}$$

gdje je :

L	-	Mjera dobivena t-ticalom, mm
L_{12}	-	Mjera dobivena t-ticalom, između pozicija 1 i 2 mm
L_{23}	-	Mjera dobivena t-ticalom, pozicija 2 i 3, mm

Nakon određivanja mjere dobivene T-ticalom (L), računamo udaljenost između središta kuglica (m) prema sljedećoj jednadžbi:

$$m = L + C - d_D$$

gdje je:

m	-	Udaljenost između središta kuglica, mm
L	-	Mjera dobivena t-ticalom, mm
C	-	Konstanta T - ticala
d_D	-	Promjer mjernih kuglica, mm

Izračunatom udaljenosti između središta kuglica m više nije potrebno vršiti nikakva mjerenja na postavljenom prstenu.

Zadnji korak prije računanja jednostavnog srednjeg promjera unutarnjih navoja D_2 jest određivanje korekcije naližeganja valjčića A_1 , te korekcije mjerne sile A_2 .

Korekcija naližeganja valjčića računa se prema:

$$A_1 = \frac{d_D}{2} \cdot \left(\frac{P}{\pi \cdot D_{2naz}} \right)^2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

dok se korekcija mjernih sila računa prema:

$$A_2 = 4W_0$$

$$W_0 = \sqrt[3]{\frac{9F^2}{8d_D} \cdot \left(\frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2} \right)^2}$$

gdje je:

W_0	-	Deformacija za slučaj dodira kugle i ravne površine, mm ²
ν_i	-	Poissonov koeficijent
F	-	Mjerna sila, N
E_i	-	Modul elastičnosti, N/mm ²
d_D	-	Promjer mjernog elementa, mm

Konačno nakon provedenog cijelog prijašnjeg proračuna možemo izračunati srednji promjer navoja prema jednadžbi:

$$D_2 = m + d_D \left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) - \frac{P}{2} \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) + A_1 - A_2$$

gdje je :

D_2	-	Srednji promjer unutarnjih navoja, mm
m	-	Udaljenost između središta kuglica, mm
d_D	-	Promjer valjčića
α	-	Kut navoja °
P	-	Korak navoja, mm
A_1	-	Korekcija naližeganja valjčića, mm
A_2	-	Korekcija mjerne sile, mm

Takav ćemo postupak ponoviti 3 puta za svaki mjerni prsten, u daljnjem radu bit će priložene tablice u kojima su vidljivi rezultati mjerenja, te konačne vrijednosti dobivene upravo prema prikazanom načinu proračuna.

4.1.1. Rezultati mjerenja metodom s T-ticalom

U priloženim tablicama u nastavku rada dane su vrijednosti pojedinih veličina upravo onim redom kojim smo u prethodnom poglavlju pojasnili način mjerenja te proračun jednostavnog srednjeg promjera navoja.

4.1.1.1. Prsten M24 m max x 3

ULAZNI PODACI		
M24 m max x 3		
d_{ref}	13,9992	mm
π	3,141592654	
P	3	mm
d_D	1,65	mm
D_2	22,051	mm
d_0	1,732050808	mm
α	60	°
$\alpha/2$	30	°
v_1	0,28	
v_2	0,25	
E_1	200000	N/mm ²
E_2	400000	N/mm ²
F	0,1	N

1. serija mjerenja

Mjerenje konstante	
1	$x = 2,4100$
2	$x = 2,4098$
3	$x = 2,4092$

	Položaj ticala		
Broj mjerenja	1	2	3
1	-0,0004	-0,0031	11,4009
2	-0,0001	-0,0007	11,4017
3	0,0002	-0,0005	11,402

IZLAZNI PODACI		
\bar{x}	2,409667	mm
C	11,58953	mm
L_1	11,40245	mm
L_2	11,40205	mm
L_3	11,40225	mm
\bar{L}	11,40225	mm
m	21,34178	mm
W_0	6,91E-05	mm ²
A_2	0,000276	mm ²
A_1	0,002321	mm ²
D_2	22,0457	mm

2. serija mjerenja

Mjerenje konstante	
1	$x = 2,4094$
2	$x = 2,4098$
3	$x = 2,4096$

Položaj ticala			
Broj mjerenja	1	2	3
1	-0,0002	-0,0033	11,3988
2	0,0000	-0,0006	11,4011
3	0,0005	-0,001	11,4002

IZLAZNI PODACI		
\bar{x}	2,4096	mm
C	11,5896	mm
L_1	11,40045	mm
L_2	11,4014	mm
L_3	11,4007	mm
\bar{L}	11,40085	mm
m	21,34045	mm
W_0	6,91E-05	mm ²
A_2	0,000276	mm ²
A_1	0,002321	mm ²
D_2	22,0444	mm

3. serija mjerenja

Mjerenje konstante	
1	$x = 2,4092$
2	$x = 2,4096$
3	$x = 2,4095$

Položaj ticala			
Broj mjerenja	1	2	3
1	-0,0003	0	11,4015
2	-0,0001	-0,0006	11,401
3	0,0002	-0,0002	11,4009

IZLAZNI PODACI		
\bar{x}	2,409433	mm
C	11,58977	mm
L_1	11,4015	mm
L_2	11,4013	mm
L_3	11,401	mm
\bar{L}	11,40127	mm
m	21,34103	mm
W_0	6,91E-05	mm ²
A_2	0,000276	mm ²
A_1	0,002321	mm ²
D_2	22,0450	mm

Na temelju dobivenih vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera za pojedinu seriju mjerenja, možemo izračunati aritmetičku sredinu koju ćemo kod usporedbe rezultata koristiti kao vrijednost koja je dobivena opisanom metodom (metoda s T-ticalom, prsten M24 m max x 3).

Jednostavni srednji promjer temeljem 3 serije mjerenja:

$\overline{D_2}$	22,0450 mm
------------------	------------

4.1.1.2. Prsten M30 x 1,5

ULAZNI PODACI		
M30 x 1,5		
d_{ref}	49,9988	mm
π	3,141593	
P	1,5	mm
d_D	0,895	mm
D_2	29,026	mm
d_0	0,866025	mm
α	60	°
$\alpha/2$	30	°
v_1	0,28	
v_2	0,25	
E_1	200000	N/mm ²
E_2	400000	N/mm ²
F	0,1	N

1. serija mjerenja

Mjerenje konstante	
1	$x = 44,3753$
2	$x = 44,3751$
3	$x = 44,3752$

	Položaj ticala		
Broj mjerenja	1	2	3
1	-0,0013	0,0009	23,8049
2	-0,002	0,0021	23,8068
3	-0,0013	0,0020	23,8079

IZLAZNI PODACI		
\bar{x}	44,3752	mm
C	5,6236	mm
L_1	23,80445	mm
L_2	23,80575	mm
L_3	23,8069	mm
\bar{L}	23,8057	mm
m	28,5343	mm
W_0	8,47E-05	mm ²
A_2	0,000339	mm ²
A_1	0,000182	mm ²
D_2	29,0251	mm

2. serija mjerenja

Mjerenje konstante	
1	$x = 44,3755$
2	$x = 44,3754$
3	$x = 44,3755$

Položaj ticala			
Broj mjerenja	1	2	3
1	-0,0013	-0,0018	23,8028
2	-0,0020	0,0012	23,8057
3	-0,0013	0,0025	23,8065

IZLAZNI PODACI		
\bar{x}	44,37547	mm
C	5,623333	mm
L_1	23,8037	mm
L_2	23,8051	mm
L_3	23,80525	mm
\bar{L}	23,80468	mm
m	28,53302	mm
W_0	8,47E-05	mm ²
A_2	0,000339	mm ²
A_1	0,000182	mm ²
D_2	29,0238	mm

3. serija mjerenja

Mjerenje konstante	
1	$x = 44,3752$
2	$x = 44,3752$
3	$x = 44,3752$

Položaj ticala			
Broj mjerenja	1	2	3
1	-0,0001	0,0025	23,8098
2	-0,0004	0,0025	23,8103
3	0,0000	0,0013	23,8102

IZLAZNI PODACI		
\bar{x}	44,3752	mm
C	5,6236	mm
L_1	23,80855	mm
L_2	23,80905	mm
L_3	23,80955	mm
\bar{L}	23,80905	mm
m	28,53765	mm
W_0	8,47E-05	mm ²
A_2	0,000339	mm ²
A_1	0,000182	mm ²
D_2	29,0284	mm

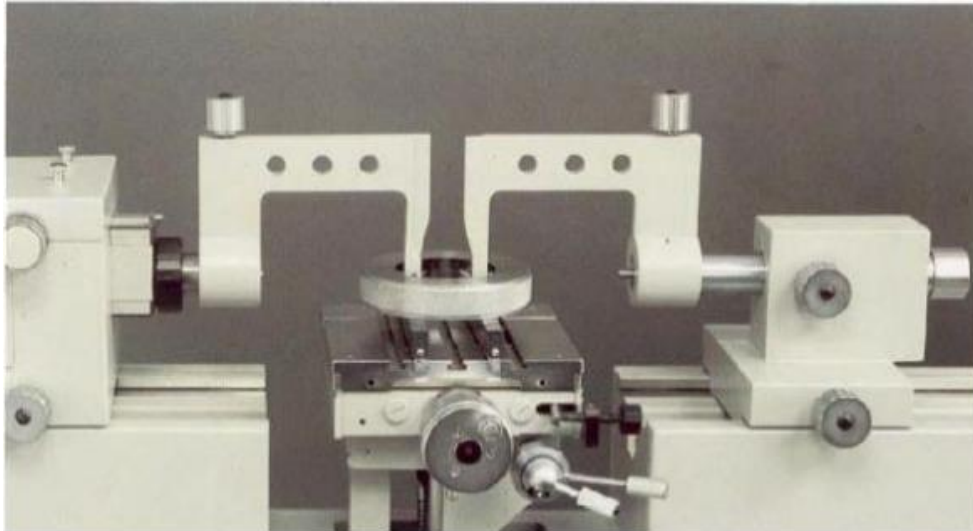
Na temelju dobivenih vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera za pojedinu seriju mjerenja, možemo izračunati aritmetičku sredinu koju ćemo kod usporedbe rezultata koristiti kao vrijednost koja je dobivena opisanom metodom (metoda s T-ticalom, prsten M30 x 1,5).

Jednostavni srednji promjer temeljem 3 serije mjerenja:

$\overline{D_2}$	29,0258 mm
------------------	------------

4.2. Postupak mjerenja metodom s mjernim čeljustima

Mjerenje jednostavnog srednjeg promjera metodom s mjernim čeljustima provodi se na univerzalnom mjernom uređaju uz primjenu mjernih čeljusti s mjernim kuglicama odgovarajućeg promjera, (slika15.). [5]



Slika 15. Uređaj za provedbu mjerenja metodom s mjernim čeljustima

Odgovarajući promjer mjernih kuglica dobije se iz jednadžbe:

$$d_0 = \frac{P}{2} \cdot \frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

nakon čega uzimamo prvu najbližu standardnu vrijednost promjera mjerne kuglice prema tablici 2.

Nakon određivanja promjera mjerne kuglice na uređaj postavljamo steznu napravu za mjerke s V-utorom (slika 16.), te postavljamo nultu vrijednost.



Slika 16. Stezna naprava za mjerke s V-utorom

Ovo je usporedna metoda mjerenja gdje se početna mjera postavljena pomoću mjerki s V-utorom uspoređuje s veličinom navoja.

Prednost ove metode jest činjenica da se navoj pod utjecajem mjerne sile sam postavi u mjerni položaj. Kako bi se omogućilo slobodno gibanje navoja, koristi se okretni mjerni stolić, (slika 17.).



Slika 17. Mjerenje jednostavnog srednjeg promjera metodom s mjernim čeljustima

Nakon mjerenja utvrđuje se razlika Δx te pomoću sljedeće jednadžbe računamo srednji promjer.

Vrijednost Δx je aritmetička sredina dobivenih mjera dvaju susjednih utora.

$$D_2 = E + (a + b) - \frac{P}{2} \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{\frac{p^2}{8}}{D_{2naz} - \frac{P}{2} \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{d_D}{2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}} + \Delta x$$

gdje je:

D_2	-	Izmjerena vrijednost srednjeg promjera unutarnjeg navoja, mm
D_{2naz}	-	Nazivni srednji promjer navoja, mm
E	-	Kombinacija planparalelnih graničnih mjerki
$(a+b)$	-	Konstanta mjerki s V-utorom
P	-	Korak navoja, mm
α	-	Kut navoja, °
d_D	-	Promjer mjernih kuglica, mm
Δx	-	Utvrđena razlika podešene vrijednosti i izmjerene vrijednosti na navoju x, mm

Takav ćemo postupak ponoviti 3 puta za svaki mjerni prsten, u daljnjem radu bit će priložene tablice u kojima su vidljivi rezultati mjerenja, te konačne vrijednosti dobivene upravo prema prikazanom načinu proračuna.

4.2.1. Rezultati mjerenja metodom s mjernim čeljustima (V-utor)

U priloženim tablicama u nastavku rada dane su vrijednosti pojedinih veličina upravo onim redom kojim smo u prethodnom poglavlju pojasnili način mjerenja te proračun jednostavnog srednjeg promjera navoja.

4.2.1.1. Prsten M24 m max x 3

ULAZNI PODACI		
d_D	1,8	mm
D_{2naz}	22,051	mm
$a+b$	6,112	mm
P	3	mm
α	60	°
$\alpha/2$	30	°
π	3,141593	

1. mjerenje	
E	20
Δx_1	-1,4148
Δx_2	-1,4146

$\overline{\Delta x}$	-1,4147
D_2	22,0440 mm

2. mjerenje	
E	20
Δx_1	-1,415
Δx_2	-1,4148

$\overline{\Delta x}$	-1,4149
D_2	22,0438 mm

3. mjerenje	
E	30
Δx_1	-11,415
Δx_2	-11,4149

$\overline{\Delta x}$	-11,41495
D_2	22,0437 mm

Na temelju dobivenih vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera za pojedinu seriju mjerenja, možemo izračunati aritmetičku sredinu koju ćemo kod usporedbe rezultata koristiti kao vrijednost koja je dobivena opisanom metodom (metoda s mjernim čeljustima, prsten M24 m max x 3).

Jednostavni srednji promjer temeljem 3 serije mjerenja:

$\overline{D_2}$	22,0438 mm
------------------	------------

4.2.1.2. Prsten M30 x 1.5

ULAZNI PODACI		
d_D	0,8	mm
D_2	29,026	mm
$a+b$	6,112	mm
P	1,5	mm
α	60	°
$\alpha/2$	30	°
π	3,141593	

1. mjerenje

E	30
Δx_1	-5,7773
Δx_2	-5,7773

$\overline{\Delta x}$	-5,7773
D_2	29,0256 mm

2. mjerenje

E	30
Δx_1	-5,7774
Δx_2	-5,7774

$\overline{\Delta x}$	-5,7774
D_2	29,0255 mm

3. mjerenje

E	20
Δx_1	4,2245
Δx_2	4,225

$\overline{\Delta x}$	4,22475
D_2	29,0277 mm

Na temelju dobivenih vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera za pojedinu seriju mjerenja, možemo izračunati aritmetičku sredinu koju ćemo kod usporedbe rezultata koristiti kao vrijednost koja je dobivena opisanom metodom (metoda s mjernim čeljustima, prsten M30 x 1,5).

Jednostavni srednji promjer temeljem 3 serije mjerenja:

$\overline{D_2}$	29,0263 mm
------------------	------------

4.3. Postupak mjerenja metodom s mjernim čeljustima (EURAMET)

Postupak mjerenja metodom s mjernim čeljustima također je proveden na univerzalnom mjernom uređaju kao i prethodni postupci.

Za proračun jednostavnog srednjeg promjera korištene su mjere koje smo dobili prethodnom metodom, dok će sam proračun bit proveden nešto drugačije.

Specifičnost ovog načina je u tome što ćemo račun provesti prema EURAMET uputi [6] ali prilagođeno metodi s mjernim čeljustima.

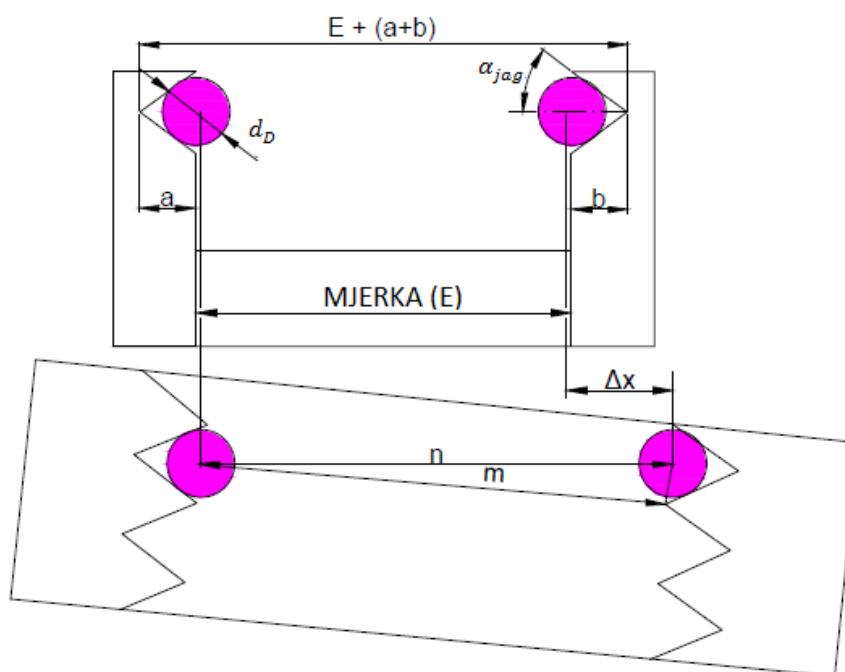
Kod ovakvog načina proračuna ne izvodi se korekcija nalijeganja mjernih elemenata u navoju (zbog jednake geometrije V-utora mjerke i navoja), što u konačnici daje različit iznos jednostavnog srednjeg promjera nego što je ranije dobiven metodom s mjernim čeljustima, također prilikom ovakvog načina proračuna nije potrebna korekcija mjerne sile (ista sila djeluje na navoj i na mjerke).



Slika 18. Mjerenje metodom s mjernim čeljustima

Jednostavni srednji promjer može se računati prema jednadžbi koja je dana u poglavlju 3.1.2 ali uz poneke preinake.

Udaljenost između središta mjernih elemenata m dobije se iz vrijednost Δx tako da se računa u smjeru okomitom na središnju os navoja



Slika 19. Određivanje udaljenosti između mjernih kuglica

Iz modela proizlazi:

$$n = E + (a + b) + \Delta x - \frac{d_D}{\sin\left(\frac{\alpha_{jag}}{2}\right)}$$

gdje je:

- | | | |
|----------------|---|--|
| n | - | Udaljenost središta mjernih kuglica u smjeru osi mjerenja, mm |
| E | - | Kombinacija planparalelnih graničnih mjerki, mm |
| $(a+b)$ | - | Konstanta mjerki s V-utorom, mm |
| d_D | - | Promjer mjernih kuglica, mm |
| Δx | - | Razlika podešene vrijednosti i izmjerene vrijednosti na navoju, mm |
| α_{jag} | - | Kut utora V-mjerki ° |

nakon dobivene vrijednosti n konačno možemo dobiti i udaljenost između središta mjernih kuglica:

$$m = \sqrt{n^2 - \left(\frac{P}{2}\right)^2}$$

gdje je:

- n - Udaljenost središta mjernih kuglica u smjeru osi mjerenja, mm
- m - Udaljenost između središta mjernih kuglica u smjeru okomitom na središnji os navoja, mm
- P - Korak navoja, mm

Na samome kraju računamo jednostavni srednji promjer prema :

$$D_2 = m + d_D \left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) - \frac{P}{2} \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

gdje je :

- m - Udaljenost između središta mjernih kuglica u smjeru okomitom na središnji os navoja
- d_D - Promjer mjernih kuglica
- α - Kut navoja °
- P - Korak navoja, mm

Takav ćemo postupak ponoviti 3 puta za svaki mjerni prsten, u daljnjem radu bit će priložene tablice u kojima su vidljivi rezultati mjerenja, te konačne vrijednosti dobivene upravo prema prikazanom načinu proračuna.

4.3.1. Rezultati mjerenja metodom s mjernim čeljustima (EURAMET)

U priloženim tablicama u nastavku rada dane su vrijednosti pojedinih veličina upravo onim redom kojim smo u prethodnom poglavlju pojasnili način mjerenja te proračun jednostavnog srednjeg promjera navoja.

4.3.1.1. Prsten M24 m max x 3

M24 max x3		
ULAZNI PODACI		
d_D	1,8	mm
D_2	22,051	mm
$a+b$	6,112	mm
P	3	mm
α	60	°
$\alpha/2$	30	°
π	3,141593	

1. mjerenje	
E	20
Δx_1	-1,4148
Δx_2	-1,4146

$\overline{\Delta x}$	-1,4147
n	21,0973
m	21,043908
D_2	22,0458 mm

2. mjerenje	
E	20
Δx_1	-1,415
Δx_2	-1,4148

$\overline{\Delta x}$	-1,4149
n	21,0971
m	21,04371
D_2	22,04563 mm

3. mjerenje	
E	30
Δx_1	-11,415
Δx_2	-11,4149

$\overline{\Delta x}$	-11,415
n	21,09705
m	21,04366
D_2	22,0455 mm

Na temelju dobivenih vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera za pojedinu seriju mjerenja, možemo izračunati aritmetičku sredinu koju ćemo kod usporedbe rezultata koristiti kao vrijednost koja je dobivena opisanom metodom (metoda s mjernim čeljustima (EURAMET), prsten M24 m max x 3).

Jednostavni srednji promjer temeljem 3 serije mjerenja:

$\overline{D_2}$	22,0457 mm
------------------	------------

4.3.1.2. Prsten M30 x 1.5

M30x1,5		
ULAZNI PODACI		
d_D	0,8	mm
D_2	29,026	mm
$a+b$	6,112	mm
P	1,5	mm
α	60	°
$\alpha/2$	30	°
π	3,141593	

1. mjerenje

E	30
Δx_1	-5,7773
Δx_2	-5,7773

2. mjerenje

E	30
Δx_1	-5,7774
Δx_2	-5,7774

3. mjerenje

E	20
Δx_1	4,2245
Δx_2	4,225

$\overline{\Delta x}$	-5,7773
n	28,7347
m	28,72491
D_2	29,0259 mm

$\overline{\Delta x}$	-5,7774
n	28,7346
m	28,72481
D_2	29,0258 mm

$\overline{\Delta x}$	4,22475
n	28,73675
m	28,72696
D_2	29,0279 mm

$\overline{D_2}$	29,0265 mm
------------------	------------

Na temelju dobivenih vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera za pojedinu seriju mjerenja, možemo izračunati aritmetičku sredinu koju ćemo kod usporedbe rezultata koristiti kao vrijednost koja je dobivena opisanom metodom (metoda s mjernim čeljustima (EURAMET), prsten M30 x 1,5).

Jednostavni srednji promjer temeljem 3 serije mjerenja:

$\overline{D_2}$	29,0265 mm
------------------	------------

5. Mjerne nesigurnosti

5.1. Nesigurnost rezultata mjerenja jednostavnog srednjeg promjera navoja dobivenih metodom s T-ticalom

Matematički model mjerenja srednjeg promjera:

$$D_2 = l + (D_{r20} - D) + d_D \cdot \left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - 1 \right) - \frac{P}{2} \cdot \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) + A_1 - A_2 + \delta B + \delta l_x - \delta l_T + \delta l_{T-Dev}$$

gdje je:

D_2	-	Srednji promjer navoja, mm
D_{r20}	-	Promjer referentnog prstena na temperaturi od 20 °C, mm
D	-	Očitana mjera referentnog prstena, mm
C	-	Konstanta T-ticala, mm
l	-	Očitana mjera navojnog prstena ($L = l + \delta l_x + \delta l_A - \delta l_T$), mm
d_D	-	Promjer mjernog valjčića, mm
$\alpha/2$	-	Polovina kuta navoja, mm
P	-	Korak navoja, mm
A_1	-	Korekcija nalijeganja mjernog valjčića u utor navoja, mm
A_2	-	Korekcija zbog mjerne sila, mm
δB	-	Korekcija zbog geometrijskih pogrešaka navoja, mm
δl_x	-	Ponovljivost mjernog sustava, mm
δl_T	-	Temperaturna korekcija, mm
δl_{T-Dev}	-	Korekcija mjerenja s T-ticalom, mm

Sastavljena varijanca srednjeg promjera navoja:

$$\begin{aligned} u^2(D_2) = & c_{d_D}^2 \cdot u^2(d_D) + c_{D_{r20}}^2 \cdot u^2(D_{r20}) + c_D^2 \cdot u^2(D) + c_P^2 \cdot u^2(P) + c_{\frac{\alpha}{2}}^2 \cdot u^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \\ & + c_{A_1}^2 \cdot u^2(A_1) + c_{A_2}^2 \cdot u^2(A_2) + c_{\delta B}^2 \cdot u^2(\delta B) \\ & + c_l^2 \cdot u^2(l) + c_{\delta l_x}^2 \cdot u^2(\delta l_x) + c_{\delta l_T}^2 \cdot u^2(\delta l_T) + c_{\delta l_{T-Dev}}^2 \cdot u^2(\delta l_{T-Dev}) \end{aligned}$$

gdje je:

- $u(d_D)$ - Nesigurnosti promjera mjernih elemenata. Pripadajući koeficijent osjetljivosti određuje se prema:

$$c_{d_D} = \frac{1}{\sin(\frac{\alpha}{2})} - 1$$

- $u(P)$ - Nesigurnosti mjerenja koraka navoja

Pripadajući koeficijent osjetljivosti iznosi:

$$c_P = \frac{\operatorname{ctg}(\frac{\alpha}{2})}{2}$$

- $u(\alpha/2)$ - Nesigurnosti mjerenja kuta navoja

Pripadajući koeficijent osjetljivosti iznosi:

$$c_{\alpha/2} = \frac{2 \cdot d_D \cdot \cos(\alpha/2) - P}{2 \cdot \sin^2(\alpha/2)} = \frac{\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2)} \cdot (d_D - d_0)$$

Faktor osjetljivosti značajno ovisi o razlici stvarnog i optimalnog promjera mjernog elementa

- $u(A_1)$ - Nesigurnosti zbog utjecaja računa korekcije naližeganja mjernog elementa u profil navoja

- $u(A_2)$ - Nesigurnosti zbog utjecaja mjerne sile

- $u(\delta B)$ - Nesigurnosti zbog utjecaja predmeta mjerenja (odstupanje od oblika) i ostalih doprinosa koji do sada nisu dozeti u obzir ovim računom.

- $u(l)$ - Nesigurnost ponovljivosti mjernog sustava

- $u(\delta l_x)$ - Nesigurnost umjeravanja mjernog uređaja

- $u(\delta l_T)$ - Nesigurnost zbog utjecaja temperature

- $u(D_{r20})$ - Nesigurnost umjeravanja unutarnjeg promjera

- $u(D)$ - Nesigurnost mjerenja referentnog prstena T-ticalom

- $\delta(l_{T-Dev})$ - Nesigurnost mjerenja s mjernim prihvatom i T-ticalom

Koeficijenti osjetljivosti koji su jednaki 1 navedeni su kako slijedi:

$$c_D = c_{A_1} = c_{A_2} = c_{\delta B} = c_l = c_{\delta l_x} = c_{\delta l_T} = c_{\delta l_{T-Dev}} = 1$$

5.1.1. Nesigurnost mjerenja s mjernim prihvatom i T-ticalom

Model nesigurnosti:

$$u^2(\delta l_{T-Dev}) = u^2(\delta l_{res}) + u^2(\delta t_{pon})$$

gdje je:

- $u(\delta l_{res})$ - Nesigurnost očitavanja, μm
 $u(\delta l_{pon})$ - Ponovljivost mjerenja s T-ticalom, μm

5.1.2. Nesigurnost mjere referentnog prstena T-ticalom

Sastavljena varijanca:

$$u^2(D) = u^2(\delta l_x) + u^2(\delta t_{T-Dev})$$

- $u(\delta l_x)$ - Nesigurnost umjeravanja univerzalnog mjernog uređaja, μm
 $u(\delta l_{T-Dev})$ - Nesigurnost mjerenja s T-ticalom, μm

Ulazna veličina	Iznos mjerne nesigurnosti u , μm	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti C	Doprinos mjernoj nesigurnosti μm
d_D	0,35	Normalna	$\frac{1}{\sin(\alpha/2)} - 1 = 1$	0,35
$\alpha/2$	Tolerancijsko polje	Pravokutna	$\frac{\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2)} \cdot (d_D - d_0)$	1,2
A_1	-	-	-	-
A_2	0,1	Pravokutna	1	0,1
δB	0,25	Pravokutna	1	0,25
l	0,2	Normalna	1	0,2
δl_x	$0,16 + 1,7 \cdot L$	Normalna	1	$0,16 + 1,7 \cdot L$
D_{r20}	0,3	Normalna	1	0,3
D	0,26	Normalna	1	0,26
δl_T	0,7		1	0,7
Δl_{T-Dev}	0,1	Pravokutna	1	0,1
$u_c(D_2)$	$\sqrt{2,89 \cdot L^2 + 0,544 \cdot L + 2,358} \approx 1,53 + 0,23 \cdot L \mu\text{m}, L \text{ u m}$			

Tablica 3. Kategorija umjeravanja 1a

Iznosi mjerne nesigurnosti za pojedini prsten:

Prsten M24 m max x 3

$$u_c(D_2) = 1,535 \text{ } \mu\text{m}$$

$$U(D_2) = 2u_c = 3,070 \text{ } \mu\text{m}$$

Prsten M30 x 1.5

$$u_c(D_2) = 1,5367 \text{ } \mu\text{m}$$

$$U(D_2) = 2 u_c = 3,0734 \text{ } \mu\text{m}$$

5.2. Nesigurnost rezultata mjerenja jednostavnog srednjeg promjera navoja dobivenih metodom s mjernim čeljustima

Matematički model mjerenja jednostavnog srednjeg promjera:

$$D_2 = m + d_D \cdot \left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) - \frac{P}{2} \cdot \text{ctg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) + A_1 - A_2 + \delta B$$

$$m = \sqrt{\left(\underbrace{E + (a + b) - \frac{d_D}{\sin\left(\frac{\alpha_{jag}}{2}\right)} + l + \delta l_x + \delta l_E - \delta l_T}_n \right)^2 - \left(\frac{P}{2}\right)^2}$$

gdje je:

D_2	-	Srednji promjer navoja, mm
D_{r20}	-	Promjer referentnog prstena na temperaturi od 20 °C, mm
E	-	Duljina referentne planparalelne granične mjerke, mm
$a+b$	-	Konstanta mjerke s v utorom, mm
l	-	Očitana mjera navojnog prstena ($\Delta x = l + \delta l_x + \delta l_E - \delta l_T$), mm
d_D	-	Promjer mjernog valjčića, mm
$\alpha/2$	-	Polovina kuta navoja, mm
$\alpha_{jag}/2$	-	Polovina kuta utora v-mjerki, mm
P	-	Korak navoja, mm
A_1	-	Korekcija naližeganja mjernog valjčića u utor navoja, mm
A_2	-	Korekcija zbog mjerne sila, mm
δB	-	Korekcija zbog geometrijskih pogrešaka navoja, mm
δl_x	-	Ponovljivost mjernog sustava, mm

- δl_T - Temperaturna korekcija, mm
 δl_E - Ponovljivost stezanja kombinacije planparalelne granične mjerke i mjerki s V utorom
 m - Udaljenost središta mjernih kuglica, mm
 n - Udaljenost središta mjernih kuglica u smjeru osi mjerenja, mm

Sastavljena varijanca srednjeg promjera navoja $u(D_2)$:

$$u^2(d_2) = c_m^2 \cdot u^2(m) + c_{d_D}^2 \cdot u^2(d_D) + c_P^2 \cdot u^2(P) + c_{\frac{\alpha}{2}}^2 \cdot u^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) + c_{A_1}^2 \cdot u^2(A_1) + c_{A_2}^2 \cdot u^2(A_2) + c_{\delta B}^2 \cdot u^2(\delta B)$$

Sastavnice mjerne nesigurnosti iste su kao i kod metode s T- ticalom.

5.2.1. Nesigurnost veličine n

Veličina n izračunava se prema:

$$n = E + (a + b) - \frac{d_D}{\sin\left(\frac{\alpha_{jag}}{2}\right)} + l + \delta l_x + \delta l_E - \delta l_T$$

Sastavljena varijanca je :

$$u^2(n) = c_E^2 u^2(E) + c_{(a+b)}^2 u^2(a + b) + c_{d_D}^2 u^2(d_D) + c_{\alpha_{jag}/2}^2 u^2(\alpha_{jag}/2) + c_{\Delta l}^2 u^2(l) + c_{\delta l_E}^2 u^2(\delta l_E) + c_{\delta l_T}^2 u^2(\delta l_T)$$

Koeficijenti osjetljivosti jednaki jedinici navedeni su kako slijedi:

$$c_E = c_{(a+b)} = c_{\alpha_{jag}/2} = c_l = c_{\delta l_E} = c_{\delta l_T} = 1$$

Ulazna veličina	Iznos mjerne nesigurnosti u , μm	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	Doprinos mjernoj nesigurnosti, μm
d_D	0,35	Normalna	2	0,7
$\alpha_{jag}/2$	0,0032°	Normalna	10,73mm/rad	0,6
$a+b$	0,75	Normalna	1	0,75
E	0,05	Normalna	1	0,05
δl_x	0,17	Normalna	1	0,17
δl_E	0,05	Normalna	1	0,05
Δl_T	0,06	Normalna	1	0,06
l	0,15	Normalna	1	0,15
$u_c(n)$	1,21 μm			

Tablica 4. Sastavnice mjernih nesigurnosti veličine n

Koeficijent osjetljivosti c_n izračunat je prema:

$$c_n = \frac{n}{\sqrt{n^2 + \left(\frac{P}{2}\right)^2}}$$

Ulazna veličina	Iznos mjerne nesigurnosti u	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	Doprinos mjernoj nesigurnosti μm
d_D	0,35	Normalna	$\frac{1}{\sin(\alpha/2)} - 1 = 1$	0,35
$\alpha/2$	Tolerancijsko polje	Normalna	$\frac{\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2)} \cdot (d_D - d_0)$	0,8
A_1	-	-	-	-
A_2	0,1	Pravokutna	1	0,1
δB	0,25	Pravokutna	1	0,25
Δn	1,21	Normalna	0,12	0,15
$u_c(D_2)$	0,926 μm			

Tablica 5. Kategorija umjeravanja 2a

Kod metode sa mjernim čeljustima standardna mjerna nesigurnost jednaka je za oba prstena te za obje metode proračuna jednostavnog srednjeg promjera.

$$u_c(D_2) = 0,926 \mu\text{m}$$

dok je proširena mjerna nesigurnost:

$$U(D_2) = 2u_c = 1,852 \mu\text{m}$$

Matematički model i proračun mjerne nesigurnosti preuzet je iz literature [2]

5.3. Usporedba rezultata

U tablici 6. prikazane su srednje vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera koje su dobivene nakon mjerenja navojnih prstena pojedinom metodom po 3 puta.

Rezultat mjerenja jednostavnog srednjeg promjera metodom s mjernim čeljustima na prstenu M24 m max x 3, kada se u obzir uzme mjerna nesigurnost, nije usporediv s rezultatom srednjeg promjera ostvaren metodom s T-ticalom (referentna mjerna metoda). Kada rezultate mjerenja metodom s mjernim čeljustima prilagodimo preporukama iz EURAMET *cg-10 v2.1* upute rezultat mjerenja srednjeg promjera je usporediv s rezultatom srednjeg promjera ostvaren metodom s T-ticalom.

Prilikom mjerenja nije uočen nikakav nedostatak metode s mjernim čeljustima, a kao glavna prednost bi se mogla navesti jednostavnost i brži postupak mjerenja nego metodom s T-ticalom.

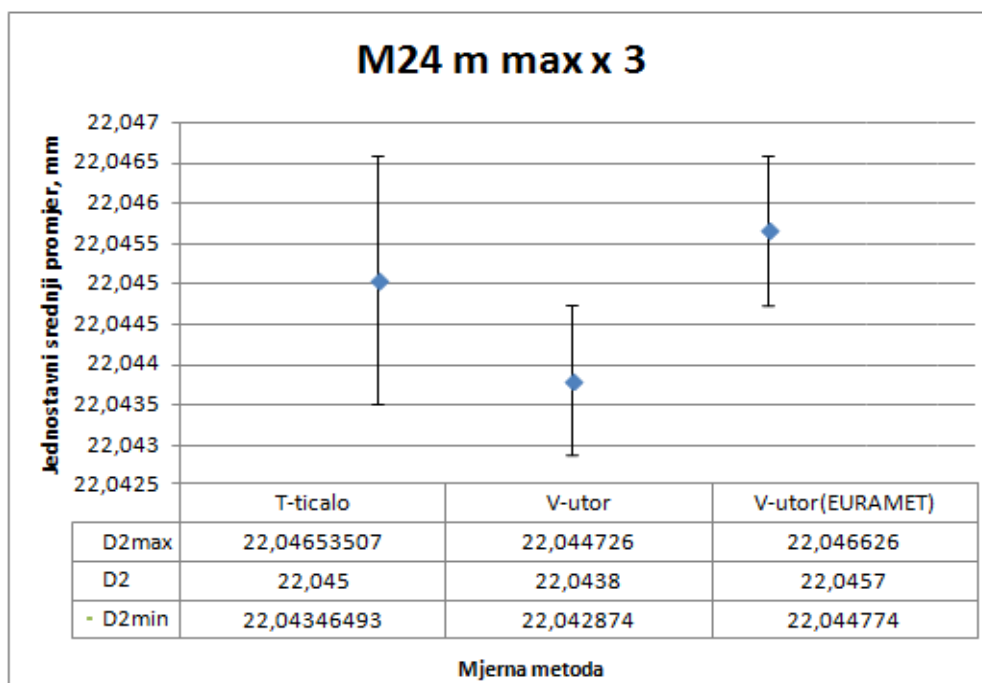
M24m max x 3			
	T-ticalo	V-utor	V-utor (EURAMET)
D_2	22,04575161	22,043977	22,04583
D_2	22,04441828	22,043779	22,04563
D_2	22,04500161	22,043729	22,04558
$\overline{D_2}$	22,04505717	22,04382833	22,04568

M30 x 1,5			
	T-ticalo	V-utor	V-utor (EURAMET)
D_2	29,0251048	29,02566	29,02587
D_2	29,023821	29,02556	29,02577
D_2	29,0284548	29,02771	29,02792
$\overline{D_2}$	29,02579353	29,02631	29,02652

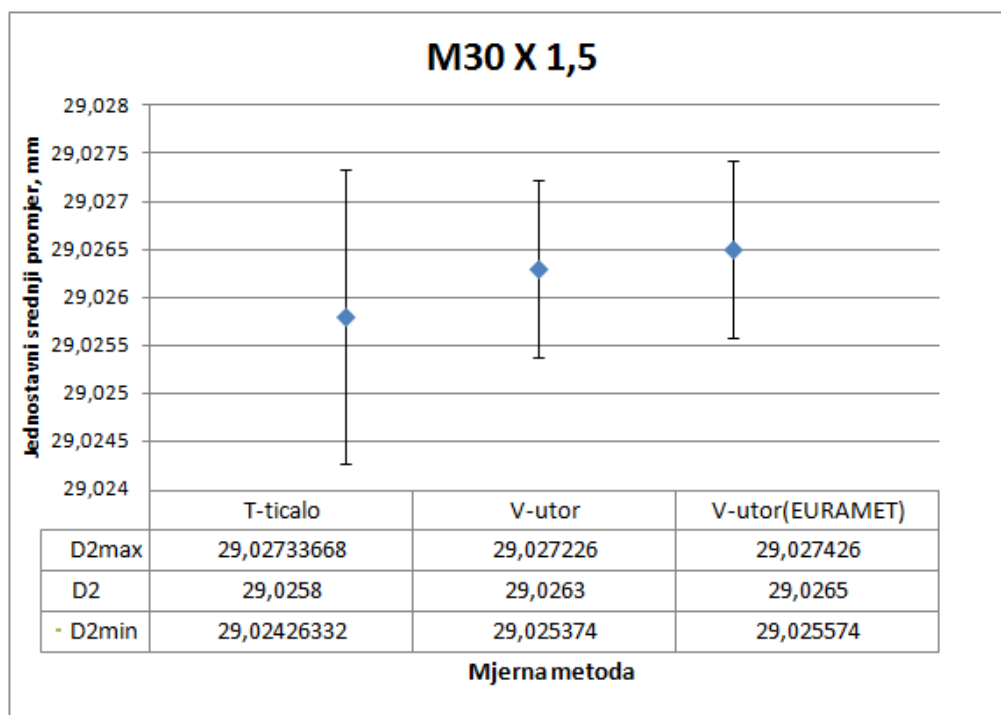
Tablica 6. Usporedba rezultata

5.4. Grafički prikaz srednje vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera

U dijagramima na slici 20. i 21. prikazane su aritmetičke sredine jednostavnog srednjeg promjera uz proširenu mjernu nesigurnost za pojedinu metodu odnosno pojedini prsten.



Slika 20. Dijagram vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera za prsten M24 m max x3



Slika 21. Dijagram vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera za prsten M30 x 1,5

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu ukratko je objašnjen pojam jednostavnog srednjeg promjera navoja, te su prikazane različite metode (metoda s T-ticalom, metoda s mjernim čeljustima, metoda s mjernim valjčićima, mjerenje koraka navoja, skeniranje profila navoja, mjerenje oblika zavoja, metoda aksijalnog presjeka, metoda s projiciranjem slike) kojima se isti može odrediti.

Pojedine metode mjerenja jednostavnog srednjeg promjera su detaljnije objašnjene (metoda s T-ticalom, metoda s mjernim čeljustima, metoda s mjernim valjčićima, optičke mjerne metode, ručne mjerne metode) te su su provedena i laboratorijska mjerenja u svrhu dobivanja vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera.

Laboratorijska mjerenja provedena su na univerzalnom jednoosnom mjernom uređaju, uz korištenje različitih steznih i mjernih prihvata, ovisno o primijenjenoj mjernoj metodi (metoda s T-ticalom, metoda s mjernim čeljustima, metoda s mjernim čeljustima uz primjenu EURAMET *cg-10 v2.1* upute). Metoda s mjernim čeljustima je metoda koja je već dugo poznata, no od većine mjeriteljskih instituta nije prihvaćena, a kao mjerodavna metoda koristi se metoda s T-ticalom.

Mjerenja su izvršena na dva različita navojna promjera kako bi se utvrdilo da li su metode usporedive neovisno o nazivnom promjeru. Rezultat mjerenja jednostavnog srednjeg promjera metodom s mjernim čeljustima na prstenu M24 m max x 3, kada se u obzir uzme mjerna nesigurnost, nije usporediv s rezultatom srednjeg promjera ostvaren metodom sa T-ticalom (referentna mjerna metoda). Kada rezultate mjerenja metodom s mjernim čeljustima prilagodimo preporukama iz EURAMET *cg-10 v2.1* upute rezultat mjerenja srednjeg promjera je usporediv s rezultatom srednjeg promjera ostvaren metodom sa T-ticalom.

Provedena laboratorijska mjerenja opisana u ovom radu potvrdila su prikladnost metoda s mjernim čeljustima uz primjenu EURAMET *cg-10 v2.1* upute kao pouzdane metode za određivanje vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera navoja.

Kako je sama provedba mjerenja metodom s mjernim čeljustima puno brža od metode s T-ticalom, koja između ostalog zahtjeva i veću vještinu samog mjeritelja, možemo govoriti o smanjenju vremena i ukupnih resursa za provedbu mjerenja jednostavnog srednjeg promjera navoja uz ostvaren pouzdan mjerni rezultat.

LITERATURA

- [1] Damir Jelaska *Elementi strojeva* Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split, 2006.
- [2] Vedran Šimunović, *Utjecaj mjernih postupaka na rezultat mjerenja srednjeg promjera navoja*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2014.
- [3] Božidar Križan, Saša Zelenika, *Vijčani spojevi* (pomoćni materijali za kolegij "konstrukcijski elementi I"), Tehnički fakultet Rijeka, 2007.
- [4] K. H. Decker: *Elementi strojeva*, Tehnička knjiga Zagreb, 2006.
- [5] Filip Novak, *Utjecaj mjerne sile na rezultate mjerenja vanjskih i unutarnjih promjera*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2014.
- [6] EURAMET, Calibration Guide cg-10 v2.1 Determination of Pitch Diameter of Parallel Thread Gauges by Mechanical Probing, 2012.